

# 脉冲磁场对 TC4 钛合金析出行为及力学性能的影响

孙中豪, 邢淑清, 程 桥, 苏怡卉, 贺骁勇, 麻永林

(内蒙古科技大学 材料与冶金学院, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:** 为了探讨脉冲磁场对 TC4 钛合金析出行为的影响, 在其时效过程中施加了脉冲磁场, 分别在形核阶段和长大阶段进行观察与分析, 利用扫描电镜、透射电镜、拉伸试验机研究脉冲磁场在 TC4 时效过程中对显微组织、强度和塑性的影响, 并通过经典形核理论及扩散理论分析了脉冲磁场在时效过程中的作用机制。结果表明, 由于脉冲磁场的加入, TC4 析出速度明显提高, 相同时间下析出相的体积分数增加, 在保证力学性能的前提下, 降低了时效所需的时间。施加脉冲磁场时效 2 h 相较于未施加脉冲磁场 4 h 延伸率塑性提高了 21.68%, 抗拉强度基本一致。在脉冲磁场和温度场耦合作用下时效, 可使 TC4 提前 (2 h) 进入过时效阶段; 在拉伸断口方面, 施加脉冲磁场在 2 h 前断口形貌为韧窝断口, 但当时间增加至 2 h 后, 断口逐渐转变为准解理断口形貌, 表明脉冲磁场可以加速时效进程。分析认为, 脉冲磁场通过磁吉布斯自由能促进了 TC4 在时效过程中次生相的析出及长大, 是由于降低临界形核功和促进原子扩散的协同效应所致。

**关键词:** TC4 钛合金; 脉冲磁场; 力学性能; 析出行为

**中图分类号:** TG146.23

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2022)09-3336-09

TC4 (Ti-6Al-4V) 钛合金属于 Ti-Al-V 系  $\alpha+\beta$  型中强钛合金。由于其优越的比强度、塑性及腐蚀性而广泛应用于航空航天工业及一些轻质受力构件中<sup>[1-3]</sup>。众所周知, 合金的主要强化机制包括固溶强化、细晶强化、形变强化和沉淀强化<sup>[4]</sup>。对于钛合金而言, 其中沉淀强化为最典型、最重要的强化机制。实现钛合金高强度研究的关键是在时效处理后形成高密度纳米尺寸析出物<sup>[5]</sup>, 这会阻碍位错的定向运动。所以如何结合上述加强机制, 更全面、有效地提高合金的力学性能被广泛关注(例如析出物的大小、数量和体积分数等)。值得注意的是, 大多数关于合金沉淀行为的研究都集中在热处理过程上<sup>[6-9]</sup>。对于合金的析出行为与其他领域的影响(如脉冲磁场)需要引起关注, 这可能为 TC4 合金的析出行为与力学性能的研究提供新思路。

磁场已被证明是调节材料组织的一种有效方法, 通过影响相变热力学和动力学条件改变了合金的微观结构、形态、组成分布和性能。磁场主要应用于凝固处理<sup>[10]</sup>及热处理<sup>[11]</sup>中。Li 等<sup>[12]</sup>利用不同磁场强度的高脉冲磁场 ( $B=2, 3, 4$  T) 研究了固体 TC4 钛合金的微观结构演化和力学性能, 研究结果表明虽然 TC4 是一种经典的顺磁性合金非磁性物质, 但磁场却影响了相变行为。Liu 等<sup>[13]</sup>探究了脉冲磁场对 CGAA2219 合金的影响, 结果表明脉冲磁场通过提高

铜原子扩散的活化能, 加速原子扩散, 从而提高了合金的强度及硬度。

综上所述, 脉冲磁场可以在热处理阶段影响金属及其合金的相变及析出行为。但目前针对脉冲磁场对固态相变的研究大多数停留在电磁力, 磁压等方面<sup>[14,15]</sup>, 但是对于脉冲磁场在热力学及动力学方面的研究较为缺乏。本研究针对轧态 TC4 钛合金, 在时效阶段施加了磁场并展开了时间梯度, 较为系统地研究了脉冲磁场在时效阶段对 TC4 钛合金析出行为的影响, 通过经典形核理论及析出动力学, 探讨了脉冲磁场对次生相析出行为的影响, 为脉冲电磁场能够有效地促进形核, 加速次生相的析出提供了理论支持。

## 1 实验

本实验所采用的材料为热轧 TC4 钛合金板材, 尺寸为 150 mm×150 mm×4 mm, 其成分见表 1。其轧态的微观组织如图 1 所示。

采用连续金相升温法测得其相变点为  $(980 \pm 5)$  °C。固溶温度一般在  $\beta$  转变温度以下 30 °C, 时效温度通常选取在 470~530 °C<sup>[16]</sup>。所以本试验采用的热处理制度为固溶 940 °C (WC), 时效温度为 500 °C (AC)。在此基础上设置了时间梯度, 并开展了施加脉冲磁场和未施加脉冲磁场的对比试验。

收稿日期: 2021-09-10

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金 (2018MS05008, 2020MS05046)

作者简介: 孙中豪, 男, 1997 年生, 硕士生, 内蒙古科技大学材料与冶金学院, 内蒙古 包头 014010, E-mail: 429623353@qq.com

表 1 TC4 的化学成分

**Table 1 Chemical composition of TC4 alloy ( $\omega/\%$ )**

Al	V	Fe	C	O	N	Ti
6.30	4.31	0.162	0.026	0.061	0.007	Bal.

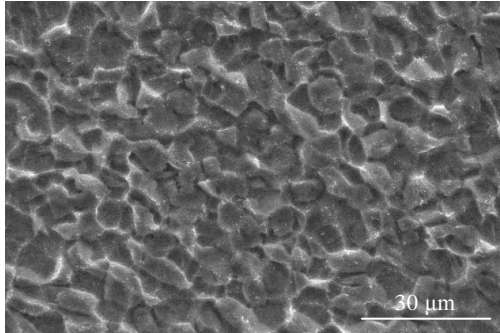


图 1 TC4 合金轧制态的 SEM 组织

Fig.1 SEM microstructure of as rolled TC4 alloy

本次试验采用的热处理炉为自行研发的脉冲磁场管式加热炉，其设备原理图如图 2 所示。设备主要由脉冲磁场发生器和加热控温系统组成，试样置于石英管中，磁场方向与石英管轴向平行。过特斯拉计测量，本次试验的磁感应强度为 19.17 mT，具体处理工艺如表 2 所示。

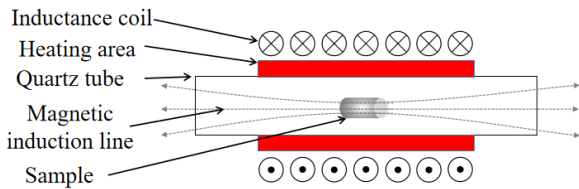


图 2 脉冲磁场管式加热炉

Fig.2 Pulsed magnetic field tubular heating furnace

表 2 TC4 合金脉冲磁场热处理工艺参数

**Table 2 Process parameters of pulsed magnetic field heat treatment for TC4 alloy**

Sample No.	Time of aging, $t/h$	Magnetic induction intensity, $B/mT$
1#	1	19.17
2#	2	19.17
3#	3	19.17
4#	4	19.17
5#	1	0
6#	2	0
7#	3	0
8#	4	0

金相制样的制备工序为：打磨、抛光和腐蚀。抛光剂采用粒度为 0.06  $\mu m$  的二氧化硅悬浮液，腐蚀液为  $HF+HNO_3+H_2O$  (体积比为 2:5:43) 的 Kroll 试剂。制备完毕后，在 Sigma-300 型场发射扫描电子显微镜下采用二次电子成像 (SE) 观察 SEM 组织，并通过 Image-pro 测量软件统计体积分数，采用 Talos F200i 型透射电镜进行了衍射花样观察以及高分辨测试，随后用 Nano-Measurer 软件进行测距。使用 WDW-50 型电子万能试验机进行拉伸试验，加载速率为 0.5 mm/min，通过最大拉伸力计算抗拉强度，并测量其伸长率。

## 2 实验结果

### 2.1 脉冲磁场对微观组织的影响

在 TC4 钛合金的时效阶段，亚稳态  $\beta$  相会分解为细小弥散的时效  $\alpha$  相 ( $\beta_m \rightarrow \alpha$ )。固态相变的驱动力为新旧两相 Gibbs 自由能之差，普通时效通常以提高系统温度来增加相变驱动力，即  $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ 。但目前已经证明脉冲磁场与温度场同样可以增大两相 Gibbs 自由能之差，促进固-液<sup>[17]</sup>、固-固<sup>[18]</sup>的新相生成，提高形核率，减少了反应时间。

图 3 为 940  $^{\circ}C$  固溶态组织，经过两相区固溶处理后组织为等轴初生  $\alpha + \beta$  转变组织。由于固溶采用水冷方式冷却，所以高温下的过饱和  $\beta$  相转变成了针状  $\alpha'$  马氏体，从而为后续的时效处理提供了热力学条件。

固溶试样在 500  $^{\circ}C$  进行不同时间时效的组织见图 4。在脉冲磁场作用下，时效时间为 1 h 时 (图 4a)，除经两相区保留的初生等轴  $\alpha$  相的同时，还存在板条  $\alpha$  相和  $\beta$  转变组织。时效时间上升为 2 h 时 (图 4b) 板条  $\alpha$  相数量增加，且分布弥散，此类组织为理想的双态组织。当时效时间继续上升时 (图 4c、4d) 板条  $\alpha$  尺寸增大且数量减小，且长宽比在增加，由板条状。相针状转变此类组织会使 TC4 合金的力学性能下降，

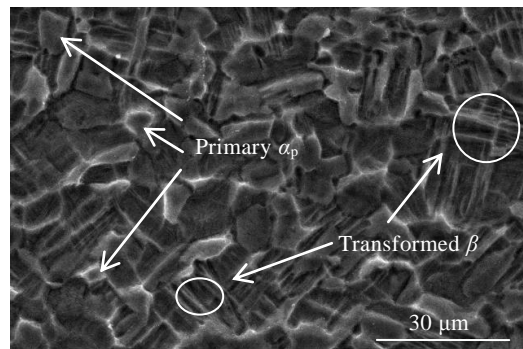


图 3 经过 940  $^{\circ}C$  固溶处理的 TC4 合金 SEM 组织

Fig.3 SEM microstructure of TC4 alloy after solution treatment at 940  $^{\circ}C$

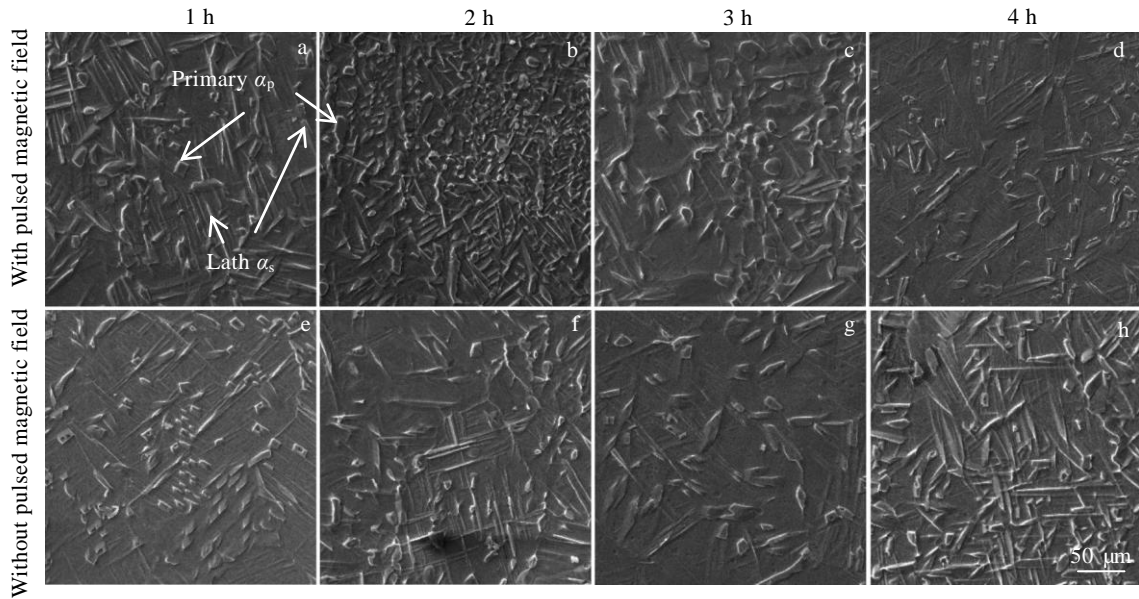


图 4 TC4 合金在 500 °C 时效不同时间的 SEM 低倍组织

Fig.4 SEM macrostructures of TC4 alloy after aging at 500 °C for different time

证明施加脉冲磁场后，最佳时效时间为 2 h 左右，即缩短了时效时间。与之对比的未施加脉冲磁场（图 4e~4h），随着时效时间的增加，生成的板条 α 相并未出现粗化的现象，且体积分数随着时效时间的增加而增加证明未施加脉冲磁场的最佳时效时间在 4 h 之后。所以从 SEM 低倍组织来看，施加脉冲磁场可以缩短时效时间，加速热处理进程。

图 5 对比了施加脉冲磁场与未施加脉冲磁场在 500 °C 时效不同时间 α 相的析出过程，照片拍摄位置在 β 转变组织位置选取。可以观察到粗大的板条 α 相，深灰

色残留 β 相以及亮白色时效 α 相。在施加脉冲磁场下作用时间为 1 h 时（图 5a），可以观察到时效 α 相在固溶阶段产生的 α' 中析出，证明脉冲磁场通过提高形核驱动力加速了时效 α 相的析出；当时效时间上升到 2 h（图 5b）时，时效 α 相数量及尺寸均有所增加。时效时间上升到 3 h（图 5c）时，析出相体积分数不仅继续增加，并且时效 α 相开始出现部分短棒状形貌，即长时间的时效会使时效 α 相尺寸增加，出现过时效现象。时效时间为 4 h（图 5d）时，时效 α 相转变成了尺寸更大的微粒，这证明了脉冲磁场能够加速 TC4 时效过程中时效 α 相的析出与长大。

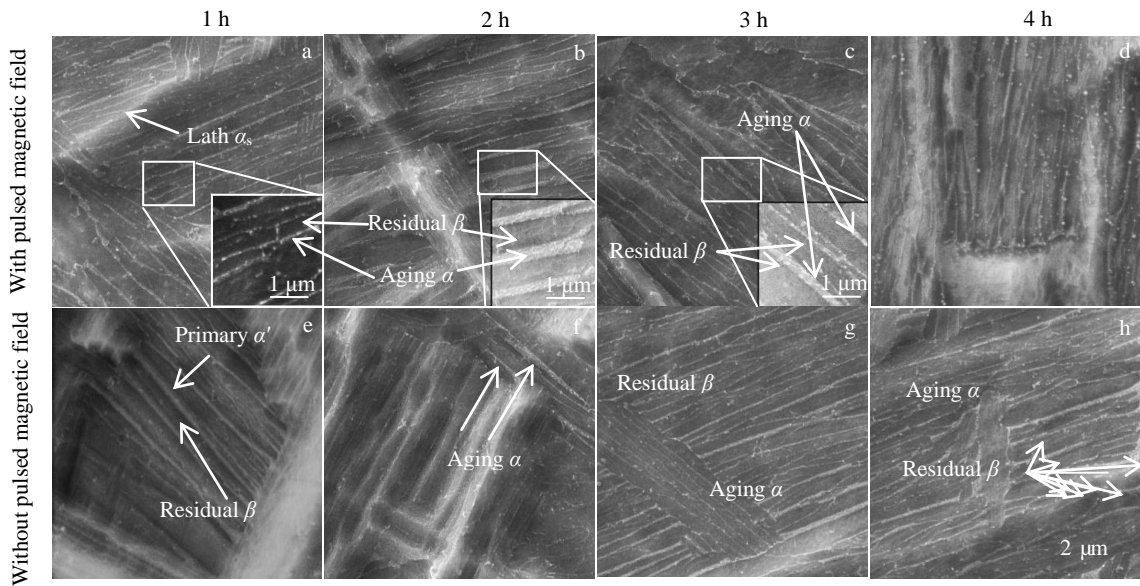


图 5 TC4 合金在 500 °C 时效不同时间的 SEM 高倍组织

Fig.5 SEM microstructures of TC4 alloy after aging at 500 °C for different time

在相同条件下时效未施加脉冲磁场时效时，时效 1 h (图 5e) 并未观察到析出相，时间增加至 2 h (图 5f) 才可以观察到部分析出相在晶内析出，然而其尺寸和体积分数要远小于施加脉冲磁场。当时效时间上升到 3 h (图 5g) 和 4 h (图 5h) 时，析出相含量才逐渐增多。

采用 Image-pro 软件对图 5 统计了时效  $\alpha$  相的体积分数，其结果如图 6 所示。可以观察在相同时间下，施加脉冲磁场次生相晶粒体积分数大于未施加脉冲磁场。

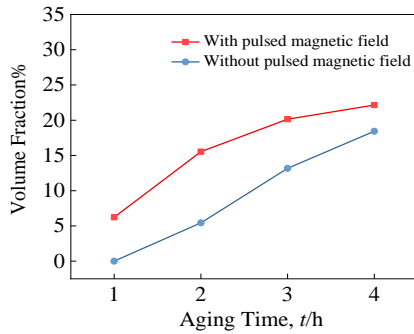


图 6 不同工艺下的时效  $\alpha$  相的体积分数

Fig.6 Volume fraction of  $\alpha$  phase under different processes

这表明脉冲磁场在时效阶段可以促进时效  $\alpha$  相的析出。

为了进一步证实施加脉冲磁场促进了时效  $\alpha$  的析出，对时效时间 1 h 时施加与未施加脉冲磁场的试样做了 TEM 分析，其结果如图 7 所示。可以观察到在施加脉冲磁场时效 1 h 时 (图 7a)，能够观察到时效  $\alpha$  相，其形貌与 Sato 等报道<sup>[19]</sup>的形貌相吻合。同时选定部分的区域电子衍射花样能够证明在黑色晶间部分存在 2 组衍射斑，2 组衍射斑叠加表明在  $\beta$  相附近析出了时效  $\alpha$  相<sup>[20]</sup>。而在相同时间下未施加脉冲磁场 (图 7b) 时，此时晶间部分只存在  $\beta$  相的衍射花样，并未出现  $\alpha$  相。同时图 7c 及图 7d 给出了 2 组工艺的高分辨析出相，证实了施加脉冲磁场后，晶间部分存在时效  $\alpha$  相，而未施加脉冲磁场只存在  $\beta$  相。因此可以判断施加磁场后促进了时效  $\alpha$  相的析出。

### 2.2 脉冲磁场对力学性能的影响

对于 TC4 合金，随着时效的进行，强度和塑性通常出现先升高后降低的情况。前者是由于析出相不断增加，亚稳态相逐渐分解为稳定的时效  $\alpha$  相，时效  $\alpha$  相的晶体结构通常与基体并不相同，当位错切过微粒时必然在其滑移面上造成原子排列错配，因此增加了滑移阻力。后者是由于若时效时间过长，往往会出现

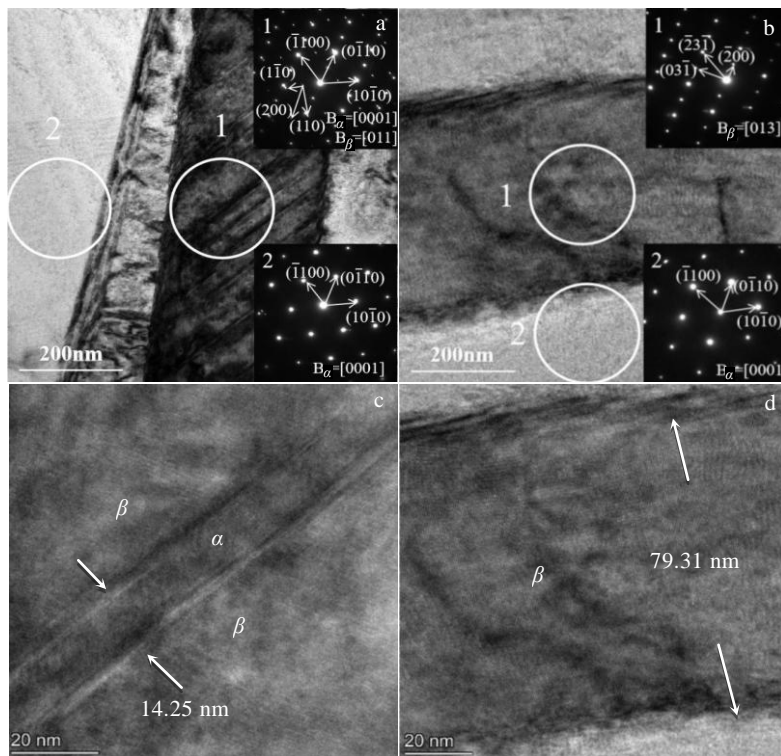


图 7 TC4 合金在 500 °C 时效 1 h 的 TEM 及 HRTEM 照片

Fig.7 TEM (a, b) and HRTEM (c, d) images of TC4 alloy after aging at 500 °C for 1 h with pulsed magnetic field (a, c) and without pulsed magnetic field (b, d)



“过时效”现象，即细小弥散的次生相开始聚合，导致微粒尺寸增大，强化效果减弱。

采用了电子万能试验机进行拉伸试验，TC4 合金在 500 °C 不同时间施加脉冲磁场前后的应力-应变曲线如图 8 所示。

### 2.2.1 抗拉强度

脉冲磁场对钛合金 TC4 的抗拉强度影响如图 9 所示，未施加脉冲磁场时，抗拉强度呈现先升高后降低的趋势，这是由于在次生相析出过程中，次生相和基体的晶格常数并不相同，从而在过渡区间造成晶格畸变，提高了对位错的阻碍，随着时效的进行，次生相的体积分数不断增大，对位错的阻碍也不断增强，但在时效后期，析出物逐渐发生聚合现象，导致畸变区减少，对位错的阻碍降低，故而强度开始下降。而在施加脉冲磁场时，强度直接呈现下降的现象，这表明施加脉冲磁场初期（1~2 h）就已经发生了“过时效”现象，并且从 2.1 中的 SEM 组织可以观察到，施加脉冲磁场（3~4 h）已经出现了时效  $\alpha$  相长大现象，此时畸变区大幅减少，对应的

抗拉强度也明显的呈现下降的趋势。这表明脉冲磁场加速了时效进程，使 TC4 钛合金在热处理过程中提早进入“过时效”阶段。除此之外，还可以观察到脉冲磁场作用 1 h 下的抗拉强度要远远高于未加磁场的抗拉强度，这是由于此时的时效  $\alpha$  相对于未施加脉冲磁场时析出相对充分，有较大的体积分数，而析出相体积分数的增加(图 5)，意味着强化了沉淀强化，故此时的抗拉强度较高。在 2 h 时，2 种情况的抗拉强度接近，为 1079.37 MPa。

### 2.2.2 延伸率

本试验通过延伸率来表征材料的塑性，图 10 反映了脉冲磁场对 TC4 钛合金延伸率的影响。在未施加脉冲磁场阶段，延伸率随着时效时间的增加而增大，这是由于随着时效的进行，时效  $\alpha$  相析出更充分，导致延伸率提高。而施加脉冲磁场时延伸率则呈现先升高后降低的情况，在 2h 时，延伸率达到 8.98%，较未施加脉冲磁场 4 h 的(7.38%)提高了 21.68%。并且时间增加到 3~4 h 后，延伸率骤降。这可以从 2.1 中的 SEM 组织看出，当施加磁场时间增加到 3~4 h 时，由于加磁时

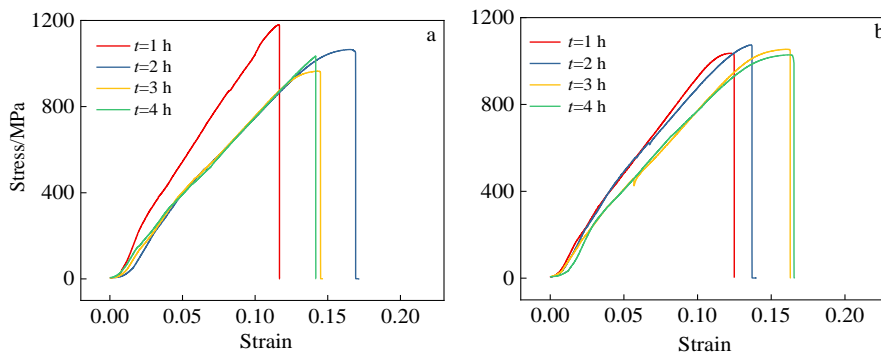


图 8 TC4 合金在 500 °C 时效不同时间施加脉冲磁场前后的应力-应变曲线

Fig.8 Stress-strain curves of TC4 alloy after aging at 500 °C for different time with pulsed magnetic field (a) and without pulsed magnetic field (b)

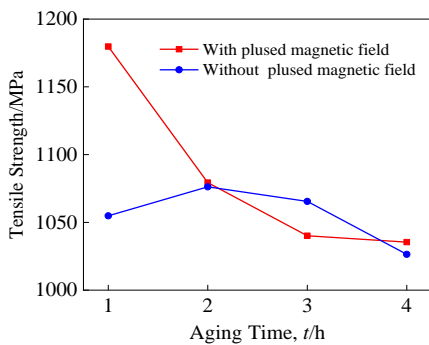


图 9 脉冲磁场对 TC4 合金抗拉强度的影响

Fig.9 Effects of pulsed magnetic field on tensile strength of TC4 alloy

间过长，导致板条  $\alpha$  相长宽比增大，晶粒粗化，致使塑性降低。同样，邹海贝的研究结果表明<sup>[21]</sup>，随着时效时间的增加，延伸率出现先增大后减小的情况。本研究结果表明，施加磁场时，缩短了延伸率到达峰值的时间。

### 2.3 拉伸断口

图 11 给出了不同工艺下 TC4 钛合金的断口形貌。在施加脉冲磁场时效 1 和 2 h (图 11a、11b) 时断口布满韧窝，为典型的韧窝断口，且中时效 2 h (图 11b) 的韧窝数量多且较深，在大韧窝内包含有若干的小韧窝，与之前的伸长率较高保持一致。时效时间增加到 3 h (图 11c) 时，断口为韧窝断口和准解理断口的混合形貌。时效时间为 4 h (图 11d) 时，断口形貌已经转变台阶状的撕裂棱，韧窝消失，此时转变为塑性较差

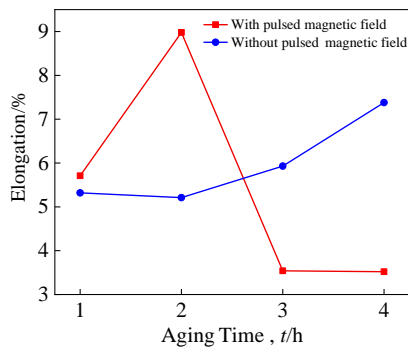


图 10 脉冲磁场对 TC4 合金延伸率的影响

Fig.10 Effects of pulsed magnetic field on elongation of TC4 alloy

的准解理断口形貌，这与 2.2.2 中所述的塑性对应。这表明施加脉冲磁场 2 h 后断口开始由韧窝断口转变为准解理断口，塑性逐渐变差。未施加脉冲磁场时效 1~4 h (11e~11f)时，可以观察到随着时效时间的增加，韧窝逐渐变得大而深，表明并未到达过时效阶段。这表明施加脉冲磁场可以加速 TC4 钛合金的时效进程，提前进入过时效阶段。

### 3 分析讨论

#### 3.1 次生 α 相形核过程

从 2.2 中的 SEM 组织可以观察到，在脉冲磁场的作用下可以更早的使次生 α 相形核，这是由于脉冲磁

场可以为原子提供高额电磁能，使第二相在时效初期迅速聚集成原子团簇，促进时效初期的第二相的形核。采用均匀形核理论进行分析，并加入磁场在形核作用中的影响，相变时的能量关系为：

$$\Delta G = \frac{4}{3} \pi r^3 (\Delta G + U_A) + 4 \pi r^2 \sigma \quad (1)$$

式中， $r$  为原子半径， $U_A$  为原子应变能， $\sigma$  为晶核表面能，两者共同作为固态相变的阻力， $\Delta G$  为固态相变中的驱动力，通常为新旧两相吉布斯自由能之差，而在施加脉冲磁场时，TC4 合金由于其顺磁性，磁扭矩的作用也会产生磁能之差，即磁吉布斯自由能<sup>[22]</sup>。其表达式为：

$$\Delta G = \Delta G_M + U_m \quad (2)$$

式(2)中第 1 项  $\Delta G_M$  为新旧两相的吉布斯自由能之差，而第 2 项  $U_m$  为磁吉布斯自由能，可表示为：

$$U_m = -\frac{1}{2} \mu_0 (\chi^\alpha - \chi^{\alpha'}) H^2 \quad (3)$$

式中， $\mu_0$  为真空磁导率， $H$  为磁场强度，括号内表示 TC4 合金在时效过程中新旧两相( $\alpha' \rightarrow \alpha$ )磁化率之差。Sun 等<sup>[23]</sup>通过控制淬火工艺发现在合金相组成中，亚稳态  $\alpha'$  的磁导率要低于  $\alpha$  相，因此 TC4 合金在时效过程中  $U_m$  为负值，即磁吉布斯自由能可作为 TC4 时效阶段的驱动力。驱动力的增加意味着临界形核功的降低，可表示为：

$$\Delta G_c = \frac{4}{27} \cdot \frac{\eta^3 \sigma^3}{(\Delta G + U_A)^2} \quad (4)$$

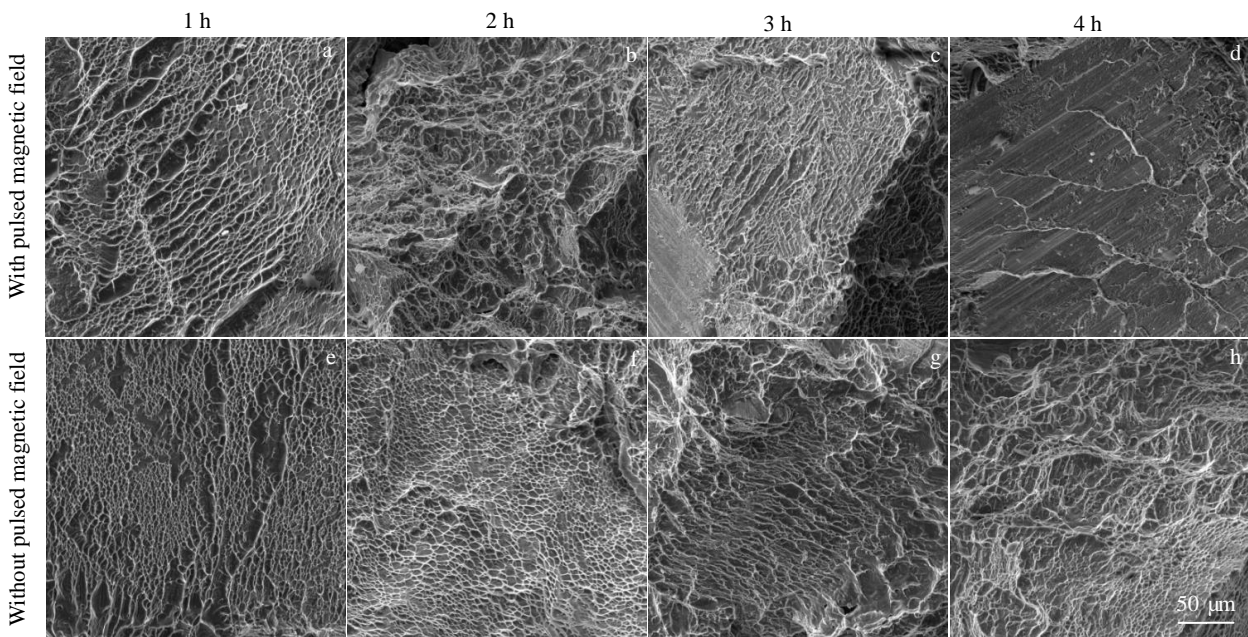


图 11 TC4 在 500 °C 时效不同时间的拉伸断口形貌

Fig.11 Tensile fracture morphologies of TC4 alloy after aging at 500 °C for different time

式中,  $\Delta G_e$  为临界形核功,  $\eta$  为形状因子,  $\sigma$  为晶核表面能。形核驱动力的增加会降低临界形核功, 使体系更容易形核。由于脉冲磁场通过磁吉布斯自由能为形核提供驱动力, 使临界形核功  $\Delta G_e$  降低, 最终促进了时效初期的形核。

### 3.2 次生相的长大过程

TC4 合金次生  $\alpha$  相是扩散型生长<sup>[24]</sup>, 所以扩散通量对 TC4 合金次生相的生长速率尤为重要。溶质原子的扩散速率与扩散系数  $D$  密切相关, 通常以阿伦尼乌斯公式 (Arrhenius equation) 来描述。为了便于计算, 通常采用其对数形式:

$$\ln D = \ln D_0 - \frac{Q}{RT} = \ln D_0 - \frac{\Delta U_V + \Delta U_A}{RT} \quad (5)$$

式中,  $D$  为扩散系数, 其大小反映了扩散的速度,  $D_0$  为初始扩散系数,  $R$  为气体摩尔常数,  $T$  为热力学温度。 $\Delta U_V$  与  $\Delta U_A$  分别为原子迁移能和空位形成能, 两者共同决定了扩散激活能  $Q$ 。

如 3.1 部分讨论, 脉冲磁场提供的电磁能可以增加原子的能量, 而能量的提高会导致原子振动的振幅增大, 从而使原子更容易越过扩散所需要的能量壁垒。而脉冲磁场的作用同样也会使扩散的原子迁移能和空位形成能降低<sup>[25]</sup>。所以, 脉冲磁场的引入会提高扩散系数。种雪颖<sup>[26]</sup>对不同初始态的 TC4 钛合金施加脉冲电流得出: 施加脉冲电流提高了原子的扩散通量, 为溶质原子的运动迁移提供了驱动力。因此扩散系数的提高加速了 TC4 合金次生  $\alpha$  相的长大过程。

以 SEM 形貌为依据, 做出了脉冲磁场在 TC4 合金时效过程中对析出行为影响的示意图。如图 12 所示, 可以观察到在时效初期, 脉冲磁场能够促进次

生  $\alpha$  相形核, 使强化相提前形核。但是由于脉冲磁场可以提高扩散通量, 会加速元素的扩散, 通过 Ostwald 熟化机制来使次生  $\alpha$  相微粒尺寸增大, 并开始出现聚合现象。

因此, 磁场不仅促进了时效初期的形核, 在时效末期也加速了次生  $\alpha$  相的聚合。所以从组织上来说脉冲磁场无论是在形核阶段还是扩散阶段, 都会以电磁能的方式作用于时效过程中, 从而加速 TC4 合金的时效进程。这表明施加脉冲磁场可以缩短时效时间, 使其次生相组织提前进入到过时效阶段。

### 3.3 析出动力学与强化机制

在 TC4 合金中, 相变通常以形核和长大完成, 相变速率决定形核率和长大速度。目前关于析出动力学的研究十分广泛<sup>[27,28]</sup>, 在相变过程中, 通常以 Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov (JMAK) 方程来描述新相体积分数与激活能及反应时间的关系, 通常可表示为:

$$f = 1 - \exp[-K_0^n \exp(-\frac{nQ}{RT}) t^n] \quad (6)$$

式中,  $K_0$  为动力学参数,  $n$  为生长指数,  $Q$  为相变激活能,  $R$  为摩尔常量,  $T$  为热力学温度,  $t$  为反应时间。在大部分等温转变下,  $K_0$  与  $n$  均保持恒定<sup>[29]</sup>。在 3.2 节中讨论过, 脉冲磁场可以以电磁能的形式减少空位形成能及原子迁移能, 从而降低了相变激活能。采用 JAMK 方程对析出相的体积分数变化进行拟合, 拟合结果如图 13 所示。从图中可以观察到, 施加脉冲磁场与未施加脉冲磁场的体积分数变化遵循 JAMK 型方程:

施加脉冲磁场:

$$f = 0.31[1 - \exp(-1.82041 \times 10^{-6} t^{1.47528})] \quad (7)$$

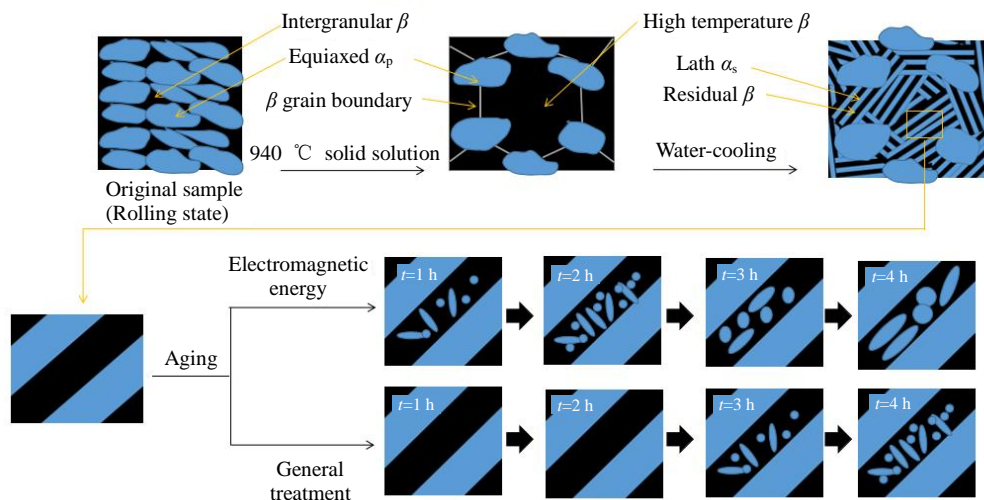


图 12 脉冲磁场对 TC4 时效析出行为影响示意图

Fig.12 Schematic diagram of the effect of pulsed magnetic field on precipitation behavior (blue area is  $\alpha$  phase; black area is  $\beta$  phase)



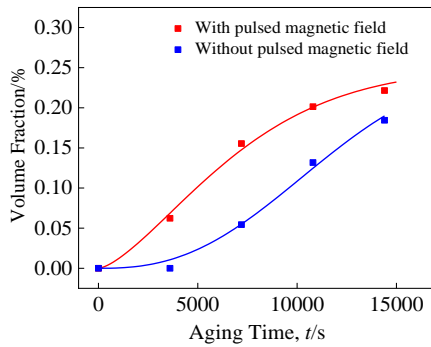


图 13 脉冲磁场作用下时效  $\alpha$  相转变体积分数随时间的变化  
Fig.13 Variation of volume fraction of aging  $\alpha$  phase transition with pulsed magnetic field

未施加脉冲磁场:

$$f = 0.31[1 - \exp(-4.80743 \times 10^{-11} t^{2.51829})] \quad (8)$$

从拟合结果来看,在其他动力学参数保持恒定的条件下,相变激活能  $Q$  的降低可以提高相变体积分数  $f$ ,施加脉冲磁场可以在相同的时间下得到更多体积分数的析出相,即脉冲磁场可以有效地加速时效进程。

时效处理期望得到细小弥散的次生相,即可以得到体积分数较大,聚合现象小,微粒尺寸小的析出相。这是由于体积分数和微粒尺寸均可以影响次生相的强化效果,其强化效果通常可以表示为<sup>[30]</sup>:

$$\tau = \alpha G \varepsilon^{\frac{3}{2}} f^{\frac{2}{3}} \left( \frac{\lambda}{b} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (9)$$

式中,  $\alpha$  为修正系数,  $G$  为基体剪切模量,  $\varepsilon$  为共格应变,  $b$  为 Burgers 矢量模。通过实验结果与分析得出脉冲磁场在时效过程中能够影响次生相体积分数  $f$  与次生相粒子间距  $\lambda$ 。本次试验在时效初期 (0~2 h), 电磁能在热力学方面来促进次生 ( $\alpha+\beta$ ) 相析出,使其在相等的时间内析出相的体积分数  $f$  增加。故在时效初期能够提升抗拉强度及塑性。但是当时效时间超过 2 h 时,组织上二次相出现了聚合现象,弥散层度下降,使次生相晶粒尺寸增大,分子间距  $\lambda$  减小。使其提前进入“过时效”阶段,对应的力学性能也大幅下降。

综上所述,脉冲磁场在 TC4 合金时效阶段中主要的作用分为 3 方面:(1) 在形核阶段通过降低临界形核功来促进形核,以便得到弥散分布的次生相;(2) 在熟化阶段由于脉冲磁场提高了扩散通量,加速了次生相的聚合以及长大。(3) 磁吉布斯自由能的引入加速了 TC4 合金在时效阶段次生相的析出行为,从而影响了其强化效果。

## 4 结 论

1) 脉冲磁场加速了 TC4 合金的时效进程:相对于普通时效,经脉冲磁场时效处理后,能够用更短的时间完成时效强化。施加脉冲磁场 2 h 达到最佳力学性能,其抗拉强度为 1079.37 MPa,延伸率为 8.98%。

2) 从热力学角度分析,由于磁吉布斯自由能的引入,导致 TC4 在时效过程中次生相临界形核功降低,使体系更容易形核,从而缩短了时效时间。

3) 在时效后期,由于脉冲磁场提高了溶质原子的扩散通量,导致次生相聚合现象更加明显,次生相尺寸增大,强化效果减弱,较早的出现过时效现象。这表明脉冲磁场能够加速体系的时效过程,从而缩短时效时间。

## 参考文献 References

- [1] Liu Z G, Liu Y, Liu S *et al.* *Materials & Design*[J], 2021, 207: 109 831
- [2] Wang Wenbo(王文博), Ma Ruixin(马瑞鑫), Jing Zhicheng(井志成) *et al.* *Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2019, 46(10): 113
- [3] Yang X W, Wang Y Y, Dong X R *et al.* *Chinese Journal of Aeronautics*[J], 2021, 34(5): 163
- [4] Ning Angang(宁安刚). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 2015
- [5] Cao F H, Zheng J X, Yong J *et al.* *Acta Materialia*[J], 2019, 34: 207
- [6] Zhang Yu(张玉), Li Ming(李明), Yang Wenlong(杨文龙) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2020, 30(10): 2322
- [7] Tan Cong(谭聪), Xiao Han(肖寒), Zhang Hongyu(张宏宇) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(12): 4290
- [8] Wu Xingchen(吴星辰), Cheng Mei(程眉), Zhang Zhimin(张治民). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2020, 30(8): 1750
- [9] Satoa K, Matsumotoa H, Kodairab K. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2010, 506: 607
- [10] Zhong Hua(钟华), Li Chuanjun(李传军), Wang Jiang(王江) *et al.* *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2016, 52(5): 575
- [11] Yuan Zhaojing(袁兆静). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Shanghai: Shanghai University, 2016
- [12] Li G R, Li Y M, Wang F F *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2019, 802: 50



- [13] Liu Y Z, Zhan L H, Ma Q Q *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2015, 647: 644
- [14] Song Jianyu(宋建宇), Lou Changsheng(娄长胜), Zhang Weiqiang(张伟强) *et al.* *Materials Science and Technology* (材料科学与工艺)[J], 2018, 26(3): 84
- [15] Mehr N F, Aashuri H. *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2019, 8(2): 2300
- [16] Pan Qiaoyu(潘巧玉), Yu Xinping(余新平), Qi Yongjie(齐永杰) *et al.* *Mechanical Engineering Materials*(机械工程材料)[J], 2019, 43(11): 21
- [17] Zheng Tianxiang(郑天祥), Zhong Yunbo(钟云波), Sun Zongqian(孙宗乾) *et al.* *Acta Physica Sinica*(物理学报)[J], 2012, 61(23): 525
- [18] Wei Meng(魏蒙). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018
- [19] Sato K, Matsumoto H, Kodaira K *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2010, 506: 607
- [20] Su J L, Ji X K, Liu J *et al.* *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2022, 107: 136
- [21] Zou Haibei(邹海贝). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019
- [22] Li Linfeng(李林风), Zhang Xuefeng(张雪峰). *Science and Technology Innovation Herald*(科技创新导报)[J], 2009, 36: 2
- [23] Sun X H, Liu D B, Zhou W W *et al.* *Materials & Design*[J], 2020, 187: 108 356
- [24] Bignon M, Bertrand E, Rivera-D íz-del-Castillo P E J *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2021, 872: 159 636
- [25] Luo J, Luo H Y, Liu C *et al.* *Materials Science & Engineering A*[J], 2020, 798: 139 990
- [26] Zhong Xueying(种雪颖). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Changchun: Jilin University, 2020
- [27] Zhou K, Liu J F, Xiao G J *et al.* *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2021, 66: 446
- [28] Tang B, Kou H C, Wang Y H *et al.* *Journal of Materials*[J], 2012, 47(1): 521
- [29] Zhang Lifang(张丽芳). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012
- [30] Chen Junzhou(陈军洲), Lv Liangxing(吕良星), Zhen Liang(甄良) *et al.* *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2021, 57(3): 353

## Effect of Pulsed Magnetic Field on Precipitation Behavior and Mechanical Properties of TC4 Titanium Alloy

Sun Zhonghao, Xing Shuqing, Cheng Qiao, Su Yihui, He Xiaoyong, Ma Yonglin

(College of Material and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

**Abstract:** In order to investigate the effect of pulsed magnetic field on precipitation behavior of as-rolled TC4 titanium alloy, a pulsed magnetic field was applied during aging. The effects of electromagnetic energy on microstructure, strength and plasticity of TC4 during aging were studied by SEM, TEM and tensile testing machine. Observation and analysis were carried out at nucleation stage and growth stage. The mechanism of electromagnetic energy in aging process was analyzed by classical nucleation theory and the first law of diffusion. The results show that the precipitation rate of TC4 is significantly increased due to the addition of electromagnetic energy. The aging time is reduced on the premise of ensuring the mechanical properties. Compared with 4 h without pulse magnetic field, the elongation of 2 h with pulse magnetic field is increased by 21.68%, and the tensile strength is approximately the same. The aging process under the coupling of pulse magnetic field and temperature field can lead TC4 to over aging stage (2 h). In the aspect of tensile fracture, the fracture morphology of fracture is dimple fracture before applying pulse magnetic field 2 h ago, but when the time increases to 2 h, the fracture surface gradually changes to the fracture morphology in quasi solution. The results reveal that the secondary phase precipitation and growth of TC4 can be promoted by pulsed magnetic field through electromagnetic energy, which is due to the synergistic effect of reducing critical nucleation work and promoting atomic diffusion. Overall, electromagnetic energy can promote the precipitation of secondary phase and reduce the aging time.

**Key words:** TC4 titanium alloy; pulsed magnetic field; mechanical properties; precipitation behavior

Corresponding author: Ma Yonglin, Professor, College of Material and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, P. R. China, E-mail: malin@imust.edu.cn